

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Strojírenství

Zaměření : Výrobní systémy

## **Reverse Engineering strojní součásti**

KVS - VS - 104

Jiří Frömel

Vedoucí práce : Ing. Petr Keller, Ph.D.

Konzultant : Ing. Aleš Najman

Počet stran : 46

Počet příloh : 3

Počet obrázků : 36

Počet tabulek : 0

Počet modelů

nebo jiných příloh: 0

V Liberci 23.5.2011

**TÉMA : REVERSE ENGINEERING STROJNÍ SOUČÁSTI**

ANOTACE : Tato bakalářská práce se zabývá 3D digitalizací reálné strojní součásti pomocí bezdotykového skeneru. Na začátku jsou vysvětleny pojmy digitalizace a reverzní inženýrství. Následuje rozdělení a popis zařízení sloužících k 3D digitalizaci. Další část se zabývá 3D digitalizací reálné strojní součásti s využitím 3D skeneru REVscan. Výstupem z této části jsou digitální data ve formě tzv. mraku bodů. Poslední část se zabývá optimalizací naměřených dat pomocí polygonové sítě v programu Geomagic Studio.

**THEME : REVERSE ENGINEERING OF MECHANICAL PART**

ANNOTATION : This Bachelor's thesis deals with the 3D digitizing of a real mechanical component using a non-contact scanner. At the beginning the notions of digitization and reverse engineering are explained. Then following distribution and description of machine for 3D digitizing. Another part deals with the digitization of real 3D engineering component using 3D scanner REVscan. The output from this part are digital data in the form of the so-called cloud of points. The last part deals with optimization of measured data using polygon network in the program Geomagic Studio.

Desetinné třídění : (př. 621.9)

**Klíčová slova** : **3D digitalizace, reverzní inženýrství, 3d skener, mrak bodů**

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2011

Archivní označení zprávy :

Počet stran : 46

Počet příloh : 3

Počet obrázků : 36

Počet tabulek : 0

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 23.5.2011

Podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi byli při tvorbě této práce jakkoliv nápomocní. Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kellerovi Ph.D. za konzultace, cenné rady, pomoc při měření součástí a za odborné rady při tvorbě modelu v softwaru Geomagic studio.

# Obsah

<b>SEZNAM ZKRATEK</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>CÍLE PRÁCE</b>	<b>9</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY</b>	<b>10</b>
1.1 3D DIGITALIZACE	10
1.1.1 Využití digitalizace	10
1.2 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ	10
1.2.1 Využití reverzního inženýrství	10
<b>2 3D SKENERY</b>	<b>11</b>
2.1 PARAMETRY 3D SKENERŮ	11
2.2 ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ	11
2.2.1 Další možné rozdělení 3D skenerů	12
2.2.2 Destruktivní 3D skenery	12
2.2.3 Nedestruktivní 3D skenery	13
2.2.4 Dotykové 3D skenery	13
2.2.4.1 Souřadnicové měřicí systémy	14
2.2.4.2 Mechanické 3D skenery	15
2.2.4.3 Měřicí ramena	16
2.2.5 Bezdotykové 3D skenery	17
2.2.5.1 Optické 3D skenery	17
2.2.5.2 Laserové 3D skenery	20
2.2.5.3 Ultrazvukové 3D skenery	21
2.2.5.4 Rentgenové 3D skenery	22
2.2.5.5 CT a MR 3D skenery	22
2.3 PŘEHLED METOD 3D SKENOVÁNÍ	23
2.4 POUŽITÍ 3D SKENERŮ	23
<b>3 SOFTWARE PRO REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ</b>	<b>24</b>
<b>4 REVERSE ENGINEERING STROJNÍ SOUČÁSTI</b>	<b>24</b>
4.1 PLÁNOVÁNÍ PROCESU	25
4.2 POPIS SNÍMACÍHO ZAŘÍZENÍ	25
4.3 MĚŘENÁ SOUČÁST	26
4.4 PŘÍPRAVA DIGITALIZOVANÉ SOUČÁSTI	26
4.5 KALIBRACE REVSCANU	27
4.6 PROCES 3D DIGITALIZACE	27
4.7 PROGRAM GEOMAGIC STUDIO V. 12	30
4.8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	30
<b>ZÁVĚR</b>	<b>38</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>43</b>

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam anglicky	Význam česky
ATOS	Advanced Topometric Sensor	
CAD	Computer aided design	Počítačem podporované konstruování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
CAI	Computer Aided Inspection	Kontrola pomocí počítače
CCD	Charge-Coupled Device	Zařízení s vázanými náboji
CGI	Capture Geometry Inside	
CNC	Computer numerical controlled	Číslicové řízení počítačem
CMM	Coordinate Measuring Machines	Souřadnicový měřicí stroj
CT	Computer Tomography	Počítačová tomografie
FEM	Finite Elements Method	Metoda konečných prvků
MR	Magnetic Resonance	Magnetická rezonance
NC	Numerical Control	Číslicové řízení
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines	Racionální Bezierovy křivky s neuniformní parametrizací
RE	Reverse Engineering	Reverzní inženýrství
	Forward Engineering	Dopředné inženýrství
2D	2-dimensional	Dvourozměrný
3D	3-dimensional	Trojrozměrný

## Úvod

Úkolem této práce je seznámení s možnostmi 3D měření a digitalizace ve strojírenství a popsáním jednotlivých typů zařízení sloužících k 3D digitalizaci. Součástí práce je také praktické využití 3D skeneru REVscan k 3D digitalizaci reálné strojní součásti a pomocí softwaru Geomagic Studio, který slouží k úpravě naměřených dat, získat přesný 3D model snímané součásti.

V současné době rostou požadavky na rychlé získání údajů nejrozličnějších reálných objektů v počítačové podobě. Tato technologie se nazývá 3D digitalizace a je to poměrně nové technické odvětví. 3D digitalizace se uplatňuje v oblasti reverzního inženýrství, což je proces převodu reálného objektu do digitální podoby.

Zařízení sloužící k 3D digitalizaci se nazývají 3D skenery a mohou být různého provedení a rozličné konstrukce. 3D skenery nabízejí nepřeberné množství využití v nejrozličnějších oborech, ale zejména se používají ve strojírenském průmyslu.

Podle principu se dají rozdělit na destruktivní a nedestruktivní 3D skenery. Nedestruktivní 3D skenery se dále dělí na dotykové a bezdotykové 3D skenery. Výstupem z většiny 3D skenerů je velké množství dat, tzv. mrak bodů.

Naměřená data se dále upravují v programech k tomu určených. V těchto programech se naměřená data převádí na polygonovou síť a pomocí úprav s využitím příslušnými funkcí se získá CAD model.

## Cíle práce

Cíl této bakalářské práce spočívá ve vypracování a ověření metodiky 3D digitalizace příslušné reálné strojní součásti a poté vytvoření CAD dat z naměřených bodů jejího povrchu pomocí speciálního softwaru (Geomagic Studio v. 12.). Vytvořený CAD model musí odpovídat reálné strojní součásti s dostatečnou přesností, aby se dal případně později využít.



# 1 Základní pojmy

## 1.1 3D digitalizace

3D Digitalizace, nazývaná také trojrozměrná numerizace je technologie, díky které se dá třírozměrný reálný objekt převést do digitální podoby, která se vhodně upraví a dále se převede do plošného nebo objemového digitálního modelu. S tímto modelem můžeme dále pracovat v CAD/CAM systémech. Zařízení sloužící k tomuto převodu se nazývá 3D skener, 3D měřicí zařízení nebo digitizér. [5, 6]

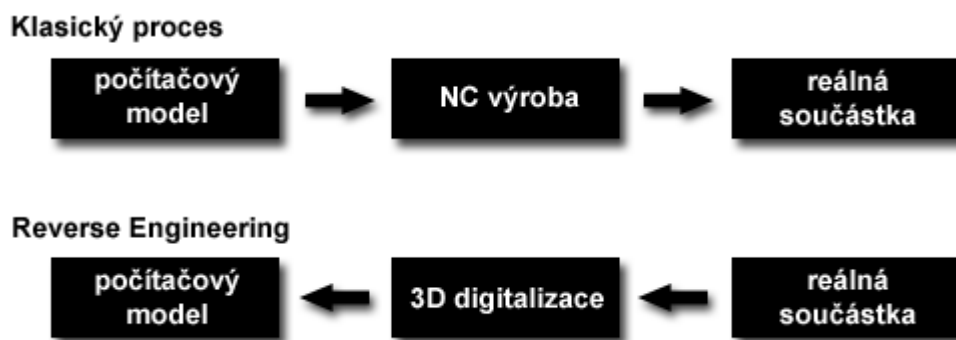
### 1.1.1 Využití digitalizace

I proto, že 3D digitalizace spoří čas a tím pádem zvyšuje produktivitu práce, je dnes velmi používaným prostředkem. Široké uplatnění má zejména ve strojírenské výrobě, ve které má různá použití, například inspekce, povrchová kontrola, numerická rekonstrukce 3D z fyzického předmětu, rychlá výroba nástrojů či rychlá výroba prototypů. Digitalizace se hojně využívá v nejrůznějších výrobních sektorech, jako je automobilový, letecký nebo lodní, své uplatnění najde také ve stavitelství, medicíně apod. [5]

Digitalizace patří do oboru reverzní inženýrství, tzv. „Reverse Engineering“ (zpětné inženýrství).

## 1.2 Reverzní inženýrství

Na rozdíl od klasického strojírenského postupu, kdy strojní součást vzniká přímo z 2D výkresu nebo 3D modelu, většinou pomocí CAD systémů, a končí výrobou reálné součásti. Tento proces lze nazvat tzv. „Forward Engineering“ (dopředné inženýrství). Proces reverzního inženýrství je přesně opačný. 3D model součásti vzniká na základě digitalizace reálné součásti. Podstata reverzního inženýrství vyplývá z obr. 1.1.



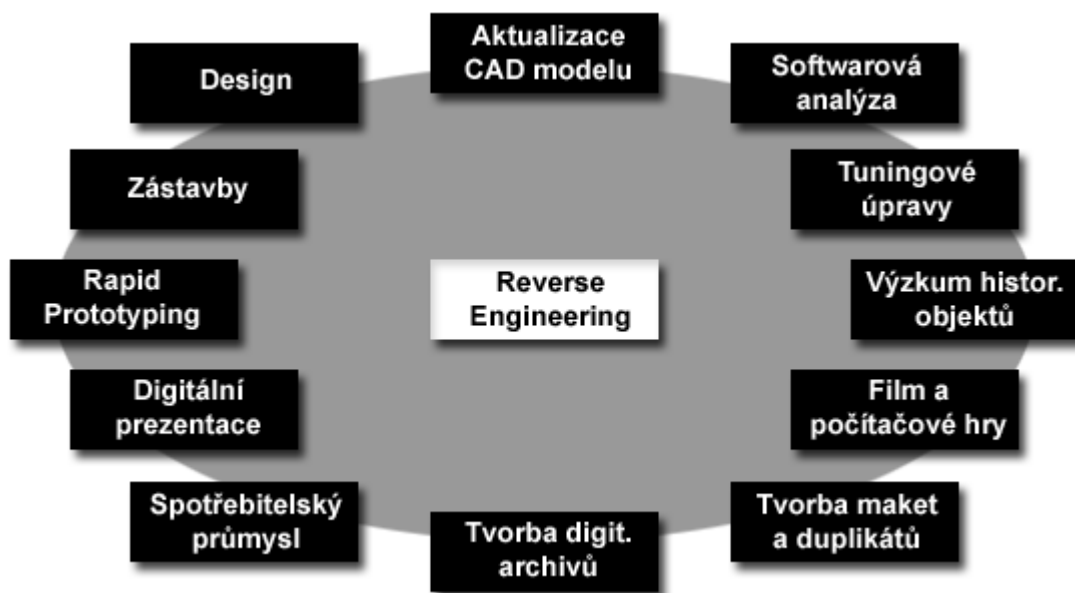
Obr 1.1: Schéma reverzního inženýrství [6]

### 1.2.1 Využití reverzního inženýrství

Reverzní inženýrství je relativně nový obor. Své využití našlo obzvlášť ve strojírenství, kde se uplatní vždy, když je od vyráběné součásti požadován 3D model v digitální podobě (např. k obnovení či tvorbě výkresové dokumentace, při kontrole součásti porovnáváním CAD modelů, k aktualizaci CAD modelu, atd.). [6]

Své využití nachází reverzní inženýrství například v designu, kdy designér vytvoří hliněný model a potřebuje ho převést do digitální podoby. Používá se při návrhu designu karoserie automobilu. Jiné využití reverzního inženýrství je např. v lékařství (navrhování

implantátů), v umění (vytváření kopií předmětů). Na obr. 1.2 jsou uvedeny možnosti využití reverzního inženýrství. [6]



Obr 1.2: Oblasti použití procesu Reverse Engineering [6]

## 2 3D skenery

3D skenery jsou zařízení sloužící k rychlé a přesné digitalizaci reálných objektů. Výstupem většiny 3D skenerů je velké množství bodů, tzv. mrak bodů. Mrak bodů představuje naskenovaný povrch objektu. 3D skenery lze členit z různých hledisek.

### 2.1 Parametry 3D skenerů

3D skenery disponují mnoha parametry, z nichž jsou nejdůležitější:

- **Měřicí objemy**

Měřicí objem je aktivní oblast v prostoru (x, y, z), ve kterém se nalézá objekt určený k digitalizaci a udává rozsah měření na jeden záběr/sekvenci měření. 3D skenery většinou umožňují jednotlivá měření napojovat na sebe a digitalizovat tak objekty větší, než je měřicí objem příslušného 3D skeneru. [24]

- **Přesnost a rozlišitelnost**

Přesnost a rozlišitelnost mají různý význam. Přesnost je rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou, zatímco rozlišitelnost označuje nejmenší možnou vzdálenost v prostoru, kterou lze změřit. [24]

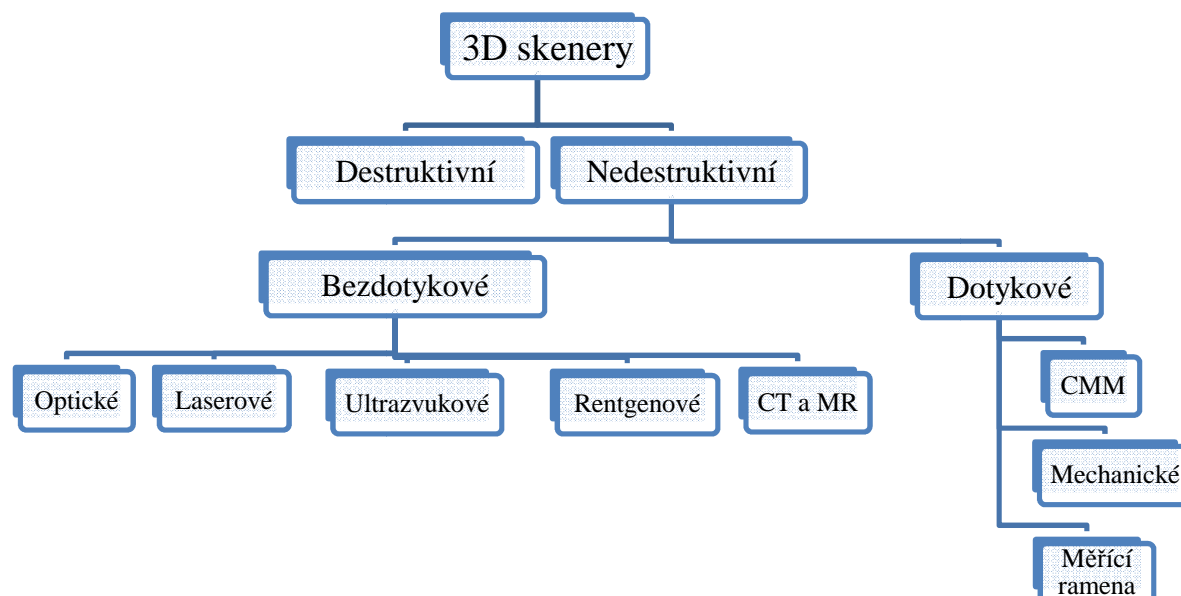
- **Rychlost**

Rychlost udává počet naskenovaných bodů za sekundu. [24]

### 2.2 Rozdělení 3D skenerů

Základním kritériem k rozdělení je stav skenovaného předmětu po ukončení procesu digitalizace. Jedná se o destruktivní a nedestruktivní 3D skenery. Podle toho, zda měřicí

zařízení přichází do kontaktu s předmětem hmotným dotykem nebo snímá body z povrchu, se dále dělí na dotykové a bezdotykové přístroje. Dotykové přístroje se dělí na souřadnicové měřicí systémy (Coordinate Measuring Machines - CMM), mechanické 3D skenery a měřicí ramena. Do skupiny bezdotykových přístrojů spadají optické, laserové, ultrazvukové, rentgenové 3D skenery, CT (Computer Tomography) a MR (Magnetic Resonance) skenery. [6, 12]



**Obr 2.1: Rozdělení 3D skenerů**

### 2.2.1 Další možné rozdělení 3D skenerů

3D skenery se dají také dělit podle toho, zda se jedná o zařízení stacionární nebo mobilní systém. Ke stacionárnímu zařízení se skenované těleso musí dopravit. Mobilní zařízení můžeme ke skenovanému tělesu přemístit. Pomocí mobilních zařízení se dají skenovat i objekty, které nelze převážet. [12]

Zařízení je také možné rozdělit, dle stupně dosahované přesnosti, což jsou zařízení s vysokou přesností (např. pro Rapid Prototyping nebo Rapid Inspection) a zařízení s běžnou přesností, které se uplatňují třeba ve filmovém nebo reklamním průmyslu. [12]

### 2.2.2 Destruktivní 3D skenery

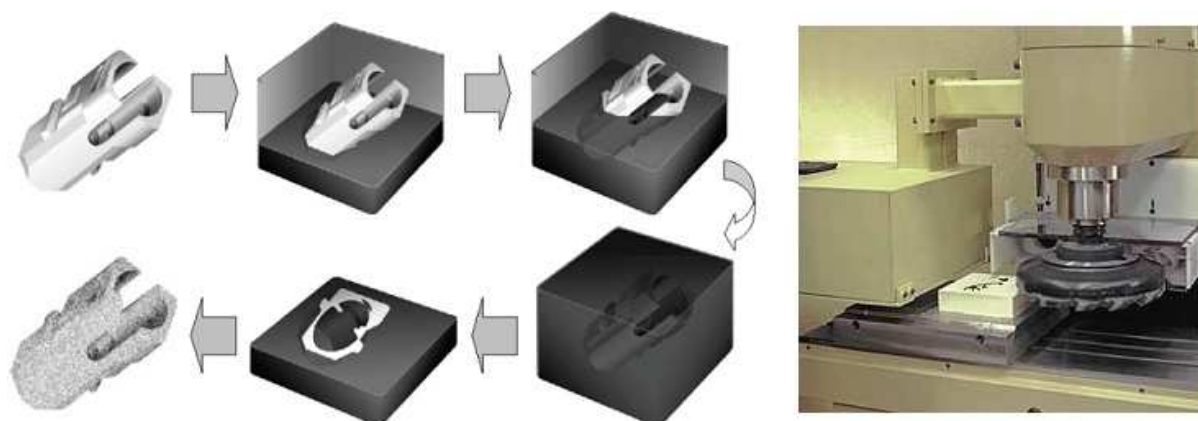
Tento typ zařízení umožňuje digitalizovat vnější povrch součásti i vnitřní geometrii součásti. Tato metoda se používá jen tehdy, můžeme-li si dovolit zničení digitalizovaného objektu. Své uplatnění má zejména v reverzním inženýrství při digitalizaci součásti se složitou vnitřní strukturou. [12]

Destruktivní skenování může být založeno na cyklickém frézování ultratenké vrstvy materiálu ze skenované součásti. Tloušťka této vrstvy se volí předem za účelem dosažení vyhovující přesnosti. Samotný proces skenování probíhá fotografováním odkrytých povrchů optickým skenerem. Získaná data se odešlou k dalšímu softwarovému zpracování. [3]

Před samotným procesem digitalizace se musí skenovaná součást připravit. Součást se připevní na nastavitelný rám a pokryje se speciálním výplňovým materiálem, který při zpracování naskenovaných snímků poskytne vysoký kontrast mezi součástí a výplňovým materiálem (např. se součást zalije tvrditelnou pryskyřicí). Aby získaná data byla správná, tak výplňový materiál musí ke skenované součásti pevně přiléhat a vyplňovat všechny její dutiny. Následně se blok umístí do vakuové komory, z níž se odčerpá vzduch a vznikne vakuum, které způsobí dokonalé vyplnění dutin součásti výplňovým materiálem. Takto připravený blok se umístí do skenovacího zařízení, kde se upevní na frézovací stůl. Skenování součásti proběhne vždy po odfrézování tenké vrstvy materiálu (proces destruktivního skenování je ukázán na obr. 2.2 nalevo; napravo je proces destruktivního skenování v zařízení RE1000, které vyrábí firma CGI). [3, 12]

Efektivitu této metody lze zvýšit skenováním více součástí najednou. To lze pouze za předpokladu, že skenované součásti jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Doba skenování závisí zejména na velikosti samotné součásti, zvolené přesnosti skenování a na počtu odebraných vrstev. Celý proces skenování trvá řádově několik hodin. [15]

Mezi výhody této metody patří možnost skenování i tvarově velmi složitých dutin, které je téměř nemožné jinými způsoby digitalizovat. Tato metoda nevyžaduje žádné nákladné speciální vybavení. Hlavní nevýhodou je již zmíněné zničení digitalizované součásti, ale i skutečnost, že materiál skenované součásti, musí být snadno obrobitelný. [3, 15]



**Obr. 2.2: Schéma destruktivního skenovacího procesu (nalevo); zařízení na měření předmětů použitím destruktivní metody (napravo) [3]**

### 2.2.3 Nedestruktivní 3D skenery

Při procesu skenování nedochází ke zničení snímaného předmětu. Dle vzájemného působení mezi měřicím zařízením a skenovaným předmětem se dále dělí na dotykové a bezdotykové 3D skenery. Nedestruktivní skenery mohou být:

- Dotykové 3D skenery
- Bezdotykové 3D skenery

### 2.2.4 Dotykové 3D skenery

Principem těchto zařízení je hmotný dotyk s povrchem skenované součásti. Rozdělují se na následující zařízení:

- Souřadnicové měřicí systémy
- Mechanické 3D skenery
- Měřicí ramena

### 2.2.4.1 Souřadnicové měřicí systémy

Dotykové zařízení používané zejména pro rozměrové měření součástí (měření rozměrů, úhlů, děr, průměrů, hřidelů, atd.), ale používají se i pro 3D digitalizaci. Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy ostatních bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X-Y-Z. Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru měřicího stroje je velkou výhodou. [1, 20]

CMM mohou být NC zařízení pohybující měřicí sondou (viz obr. 2.4) připevněnou na mechanickém rameni. Měřicí sonda zjišťuje body na povrchu měřené součásti a těmto bodům jsou přiřazeny příslušné souřadnice. Počet měřených bodů závisí na složitosti součásti a požadované přesnosti měření. Na základě získaných souřadnic může uživatel sestavit 3D model v CAD systému. Novější zařízení používají sondy, které jsou vedeny po povrchu měřené součásti a souřadnice jsou zaznamenávány v určitém intervalu, tím je měření efektivnější, přesnější a rychlejší. Nejčastěji jsou využívány sondy mechanické, které pracují na principu přímého dotyku s digitalizovanou součástí. Dalším představitelem jsou bezdotykové sondy laserové a také se používají bezdotykové sondy optické. [18, 20]

Souřadnicové měřicí systémy mají 4 základní části:

- 1) Souřadnicový měřicí stroj
- 2) Měřicí sondy
- 3) Výpočtový systém
- 4) Měřicí program

Tyto systémy mají různá provedení. Od stolních až po systémy pro měření objektů o velikosti několik metrů. Mohou být ovládány manuálně, CNC nebo počítačem. [12]

Výhodou u tohoto druhu zařízení je vysoká přesnost měření. Lze digitalizovat poměrně složité objekty s dutinami i nerovnoměrným povrchem. Nevýhodou je delší doba měření, která je dána zejména pomalým pohybem ramene, a vysoké pořizovací náklady. CMM systémy mají vyšší nároky na provozní podmínky (teplota vzduchu, relativní vlhkost, atd.). Nevýhodou je také přímý dotyk mezi měřenou součástí a měřicím zařízením (dotykem by mohly být některé měřené věci pozměněny či poškozeny). [20]



Obr 2.3: 3D souřadnicový stroj od firmy Mitutoyo [8]



**Obr 2.4: Sondy pro CMM systémy [7]**

#### **2.2.4.2 Mechanické 3D skenery**

Princip tohoto měřicího zařízení spočívá v tom, že povrch skenovaného objektu fyzicky „osaháme“ hrotem, který je připevněný na mechanickém rameni. [12]

Tyto skenery se zpravidla skládají z pevné základny a minimálně tříkloubového ramene, na jehož konci je většinou umístěna dotyková sonda. Touto sondou se dotýkáme charakteristických bodů skenovaného objektu. Rameno má v každém kloubu senzor zaznamenávající natočení ramene v tomto místě. Souřadnice skenovaného bodu jsou získány vyhodnocením údajů ze všech kloubů ramene. Takto získáme velký počet bodů, tzv. mrak bodů, který se dále optimalizuje a mapuje. [3, 12]

Před vlastním skenováním je vhodné na objektu vyznačit body, které se musí nasnímat, abychom získali přesný digitální obraz fyzického objektu. Počet těchto bodů je závislý na složitosti a velikosti tělesa a na požadované přesnosti. [12]

Touto metodou nejsou získávány informace o textuře povrchu objektu, kromě toho je tato metoda časově velmi náročná, což je dáno ručním „osaháváním“ sondou objektu. Tyto zařízení jsou vhodné pro přenesení základních designových rysů objektu, dosahovaná přesnost se pohybuje v řádech desetin milimetru. Lze je využít pro digitalizaci poměrně složitých těles, jak s dutinami, tak i s nerovnoměrným povrchem. Jsou mobilní a jejich hlavní výhodou je příznivá pořizovací cena, ve srovnání s ostatními systémy. [12]

Příkladem mechanického digitizéru je zařízení MicroScribe G2 (viz obr. 2.5).



**Obr 2.5: Mechanický skener MicroScribe G2 [13]**

#### **2.2.4.3 Měřicí ramena**

Princip měření je stejný jako u mechanických 3D skenerů. Jedná se o měřicí stroje, které převádějí pohyb ze šesti rotačních snímačů na klasický výstup X-Y-Z zpracováváný výkonným softwarem. Původní název „přenosný souřadnicový měřicí stroj“ se moc nevyužívá, lépe se uchytí název „měřicí rameno“. Měřicí ramena se používají zejména k měření velkých rozměrů nebo kontrole objemných součástí, vždy když je výhodnější, aby byl měřicí přístroj k takové součásti přemístěn. Mimo rozměrovou kontrolu se používají při reverzním inženýrství, 3D vizualizaci a modelování a také při výrobě prototypů. [10, 21]

Na rozdíl od mechanických 3D skenerů, u kterých se dosahovaná přesnost pohybuje v řádech desetin milimetru, dosahují měřicí ramena stejné úrovně přesnosti jako souřadnicové měřicí stroje. Jsou vyráběna s rozsahem měření až do 4,5 metru a měří s přesností až 0,005 milimetrů. Pořizovací cena měřících ramen není na rozdíl od jiných 3D skenerů nijak vysoká. Některá měřicí ramena mohou být součástí výrobních linek, na nichž vykonávají neustálou kontrolu vyrobených dílů. [21]



**Obr 2.6 Přenosná měřicí ramena [3]**



### 2.2.5 Bezdotykové 3D skenery

Bezdotykové neboli bezkontaktní snímací systémy nevyžadují, na rozdíl od dotykových snímacích systémů, ke své funkci hmotný dotyk s měřeným objektem. Princip bezdotykových metod vyplývá z technik, které lze do této kategorie zařadit. Nejčastěji pracují na optickém nebo laserovém principu snímání, avšak existují i systémy, které kombinují několik bezdotykových metod. [11]

Snímání 3D souřadnic povrchových bodů je velmi rychlé, proto se 3D skenery vyznačují velkou produktivitou. Měření ploch probíhá bez poškození povrchu a tyto přístroje vytváří hustou síť bodů. V podstatě vytváří numerický model z reálného předmětu. [12]

Všechny níže uvedené typy přístrojů jsou vhodné ke snímání vnější geometrie, některé těchto systémů jsou schopné snímat i geometrii vnitřní:

- Optické 3D skenery
- Laserové 3D skenery
- Ultrazvukové 3D skenery
- Rentgenové 3D skenery
- 3D skenery využívající CT a MR

#### 2.2.5.1 Optické 3D skenery

Tyto zařízení snímají měřený objekt z několika úhlů pomocí optického zařízení. Principem tohoto zařízení je vytvoření 2D snímků pomocí kamer, resp. fotoaparátů. Těchto snímků se opatří takové množství a z různých úhlů a pozic, abychom mohli digitalizovat příslušný objekt. Čím více bude mít skenovaný objekt složitější tvar, tím je nutné pořídit více snímků pro digitalizaci. Výsledkem získaných snímků je tzv. mrak bodů, jenž se optimalizuje a mapuje pomocí polygonové sítě, pomocí níž se vytvoří digitalizovaný model. [12]

Pro lepší manipulaci je vhodné skenovaný objekt umístit na speciální otočný stolek, se kterým se manipuluje ručně nebo pomocí polohovacího zařízení vybaveného krokovým motorkem řízeným počítačem. Aby byla naskenovaná data vůbec použitelná, musí se za skenovaným objektem vytvořit jednobarevné pozadí a to nejlépe s barvou, která je hodně kontrastní se skenovaným objektem. Pro snadnější a přesnější vytváření modelu je před vlastním skenováním vhodné umístit na skenovaný objekt pomocné značky. Používají se tzv. centrovací terčíky, kterých může být i několik tisíc. Je-li skenovaný objekt příliš lesklý nebo tmavý, tak je vhodné a někdy i nutné ho patřičně nasvítit a nanést na něj speciální difúzní barvu, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Ne vždy je možné na povrch měřeného objektu nanést barvu, a pak hrozí riziko vytvoření modelu s chybou. [12]

Tato metoda je vhodná pro skenování nepříliš členitých povrchů. Vnitřní dutiny a neprůchozí díry se touto metodou skenují velice komplikovaně. Oproti dotykovým systémům snímá optický skener náraz celou plochu a umožňuje sejmutá data ukládat do různých formátů (např. STL, DXF atd.). [16]

Příkladem optického 3D skeneru je produkt ATOS od firmy GOM (viz obr. 2.7) nebo ruční 3D skener HandyScan (viz obr. 2.8).





**Obr 2.7: ATOS - automatizované skenování s robotem KUKA (nalevo); optický 3D skener ATOS III (napravo) [17]**

### **I. 3D skener ATOS (Advanced Topometric Sensor)**

Systém ATOS je dle předchozího rozdělení nedestruktivní mobilní bezdotykový optický 3D skener od německé firmy GOM a je určen pro nejrůznější aplikace. Skener ATOS je určen pro rychlou digitalizaci reálných objektů, jejichž rozměry se mohou pohybovat od několika milimetrů až po několik metrů. Je vybaven kvalitními CCD snímači s vysokým rozlišením, které se v současné době pohybuje v rozmezí 800 000 až 4 000 000 obrazových bodů na jeden snímek. Využití systému ATOS je zejména v oblastech CAD, CAM a FEM kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem. [15, 17]

Systém ATOS se vyrábí v několika variantách, které se od sebe liší zejména maximálním rozlišením CCD snímačů a měřícím rozsahem. Rozdělují se tedy na ATOS I, ATOS II, ATOS IIe, ATOS III (viz obr. 2.6), ATOS SO a ATOS XL. [17]

#### **Přednosti systému ATOS (převzato z [17])**

- flexibilita (jedním zařízením lze měřit objekty od několika milimetrů do několika metrů)
- vysoké rozlišení (až 66 bodů na 1mm)
- mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)
- jednoduchost ovládání (automatický přepočet transformací)
- hmotnost a velikost měřeného objektu je prakticky neomezená
- po úpravě povrchu lze měřit i lesklé a průhledné objekty (zmatnění povrchu pomocí křídových sprejů)
- lze měřit i měkké materiály

#### **Oblasti využití digitalizovaných dat (převzato z [17])**

- kontrola kvality (Quality Control)

- reverzní inženýrství (Reverse Engineering)
- rychlá výroba prototypů (Rapid Prototyping)
- virtuální realita (Virtual Reality)
- přímé obrábění (Direct Milling)
- simulace vstřikování plastů (Simulation of Injection Molding)
- simulace tažení plechu (Simulation of Sheet Metal Forming)
- kontrola kolizí dílu (Digital Mock Up)

## **Princip funkce**

3D skener ATOS je založen na principu triangulace, k čemuž využívá stereoefektu dvou snímacích kamer. Triangulační metody jsou nejpoužívanější techniky optického měření a dělí se na dvě skupiny a to na pasivní triangulační metody a aktivní triangulační metody. Měřený objekt se umístí na otočný stolek a provede se série záběrů z různých úhlů pohledů. Povrch objektu je přes vestavěný rastr osvětlován kontrastními proužky světla, jejichž tvar na povrchu objektu je snímán dvěma kamerami. Digitálním zpracováním obrazu se automaticky vypočítají přesné 3D souřadnice jako mrak bodů. Systém je automaticky kalibrován, proto nedochází při změnách okolního osvětlení ke zkreslení souřadnic. [12, 16]

## **Postup měření [4]**

### **1. Nalepení pomocných značek**

Před skenováním se na měřenou součást umístí pomocné značky v podobě černobílých terčů, které slouží k výpočtu polohy objektu. Mají různé tvary a jejich velikost závisí na velikosti měřené součásti.

### **2. Nastříkání součásti křídovým sprejem**

Povrch skenované součásti nesmí být lesklý, neboť od lesklého povrchu by se světlo odráželo a nebylo by možné snímat. Proto se povrch nastříká křídovým sprejem.

### **3. Očištění pomocných značek**

Aby systém rozeznal pomocné značky, tak musí být očištěné od kříd.

### **4. Umístění součásti**

Měřená součást se umístí na otočný stolek s tmavým pozadím. Na stolku jsou nalepeny referenční značky stejně jako na měřené součásti.

### **5. Kalibrace**

Před prvním měřením je nutné systém kalibrovat, což se provádí pomocí kalibrační desky.

### **6. Vytvoření nového projektu**

Vytvoří se nový projekt, do něhož se ukládají naměřená data.

### **7. Nastavení intenzity osvětlení**

Pro správný průběh snímání je důležité správné nastavení optimální intenzity osvětlení. Špatně nasvícený povrch součásti nelze snímat. Intenzita osvětlení se může upravovat při každém pootočení snímané součásti.

## 8. Snímání měření součásti

Měřenou součást při každém pootočení stolku naskenujeme. Tak se postupuje až do úplného naskenování celé součásti. Měřenou součást můžeme na stolku obracet či naklánět, abychom naskenovali i hůře dostupná místa.

## 9. Práce s naměřenými daty

Naměřená data ze všech měření se aproximují do jednoho souřadného systému, čímž se sníží odchylka a zmenší se možnost chyby jednotlivých měření. Dále se získaná data optimalizují a mapují pomocí polygonální sítě, což je síť nepřekrývajících se trojúhelníků. Úpravami polygonální sítě (např. vymazání nechtěných bodů, vzniklých při skenování pozadí; uzavření děr po pomocných značkách, atd.) získáme digitalizovaný model měřené součásti.

## II. 3D skener HandyScan 3D

Jedná se o ruční přenosný a velice přesný optický 3D skener, který během měření umožňuje vzájemný pohyb skeneru a snímaného objektu. Pro zjištění pozice používá HandyScan 3D reflexní značky, které mohou být nalepeny přímo na skenovaném objektu nebo na podložce na níž je objekt umístěn a pomocí dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. Pokud obě kamery současně vidí minimálně 3 reflexní značky, tak je systém schopen automaticky určit polohu snímaného objektu. Systém nasnímaná data vyhodnocuje pomocí triangulační metody. Pro umožnění pohybu, je nutné, aby skener viděl alespoň 4 reflexní značky. Jelikož je vzájemná poloha referenčních značek jedinečná, tak systém může kdykoliv navázat na již nasnímané body, což je velká výhoda zejména při snímání velkých objektů, např. automobilů. [4, 25, 26]

Na počítači se v reálném čase zobrazují nasnímaná data skenovaného objektu, laserový kříž a automaticky se generuje polygonová síť. Okamžité zobrazování nasnímaných dat na počítači je velice výhodné, jelikož urychluje vyhledávání míst, které nebyla nasnímaná či potřebují detailnější snímání. [26]

Pomocí této technologie snímání a vyhodnocování dat lze jednoduše skenovat i tvarově složité plochy. Výstupem ze skeneru je přímo polygonová síť, která se neustále automaticky přepočítává a zpřesňuje na základě všech nasnímaných dat. V případě, že nějaká část polygonové sítě chybí nebo je potřeba detailnější zobrazení, lze se k danému místu vrátit a znovu naskenovat. [4, 25, 26]

HandyScan 3D se vyrábí v několika variantách, jenž se od sebe liší zejména rozlišením, přesností a použitím. Např. REVscan, EXAscan, VIUscan a MAXscan (viz obr. 2.8).



Obr 2.8: Zleva REVscan, EXAscan, VIUscan, MAXscan [25]

### 2.2.5.2 Laserové 3D skenery

Princip skenování je v tomto případě založen na projekci laserového paprsku na povrch snímaného objektu. Vlastní skenování spočívá, ve vyslání laserové paprsku kolmo proti snímanému objektu, od kterého se odrazí a vrátí se zpět do skenovacího zařízení, kde se

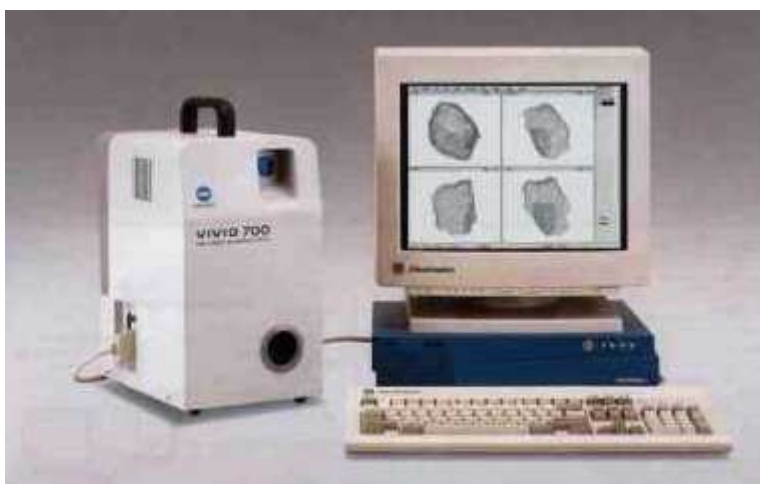
vyhodnotí. Podle doby, za kterou se laserový paprsek vrátí zpět do skenovacího zařízení a podle úhlu odrazu od snímaného objektu získá skener přesnou polohu bodu, kterou odešle do počítače. Tímto způsobem se získávají informace o geometrii povrchu. Obvykle bývá součástí skenovacího zařízení i kamera s CCD snímačem, díky které se získávají informace o textuře povrchu skenovaného objektu. [12, 14]

Kvalita digitalizovaného objektu je dána hustotou, s jakou laserový paprsek pokryl povrch skenovaného objektu. Rychlost snímání se podle konstrukce snímače a světelného výkonu laseru pohybuje od 10m/s do 100m/s. Rychlost nasnímaných bodů za jednotku času se řádově pohybuje od 10 000 do 100 000 bodů/s. Nasnímané body lze v reálném čase zpracovávat do polygonálních sítí a výsledky lze exportovat do všech známých formátů (např. STL, RML, IGES, atd.). [12, 19]

Hlavní nevýhodou laserových 3D skenerů je jejich vysoká pořizovací cena, která je v porovnání s ostatními uvedenými typy zařízení několikanásobně vyšší. Při skenování lesklých povrchů, které znesnadňují zpracování (např. se laserový paprsek odrazí pod příliš velkým úhlem a nevrátí se zpět do skenovacího zařízení) se musí upravit intenzita osvětlení, upravit výkon skeneru, případně na snímaný povrch nanést speciální zmatňující nástřik. [12, 14, 19]

Velkou výhodou laserových skenerů oproti optickým skenerům je schopnost skenovat neprůchozí otvory, či prohlubně. [12]

Mezi laserové 3D skenery se řadí zařízení od firmy Minolta s označením Vivid 700 (viz obr. 2.9).



**Obr 2.9: Laserový 3D skener Vivid 700 [12]**

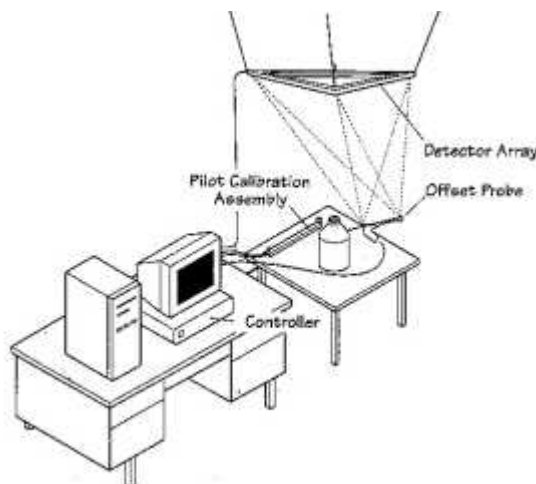
### **2.2.5.3 Ultrazvukové 3D skenery**

Mezi bezkontaktní 3d skenery náleží také ultrazvukové 3D skenery. Skenování povrchu měřeného objektu se provádí ultrazvukovou sondou. [12]

Skenování se provádí manuálně ultrazvukovou sondou ve tvaru pistole s kovovým hrotem. Pistole se přiloží k snímanému povrchu a stisknutím spouště se vyšle ultrazvukový signál, které zachytí speciální konstrukce s ultrazvukovými čidly, jejichž úkolem je vyslaný signál přijmout a dekodovat do prostorových souřadnic, jež je možno vkládat přímo do CAD systémů nebo do datových souborů. [12]

Největší výhodou tohoto zařízení je nízká pořizovací cena. Nevýhodou je relativně malá přesnost, která se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 mm, což je ovšem v mnoha oblastech zcela dostačující (např. reklama, film, animace). [12]

Na principu ultrazvuku je založen např. 3D skener Freepoint od firmy Science Accessories, jehož princip je na obr. 2.10.



**Obr 2.10: Princip ultrazvukového 3D skeneru Freepoint [12]**

#### **2.2.5.4 Rentgenové 3D skenery**

Jde o bezkontaktní nedestruktivní typ digitalizace. Rentgenové 3D skenery pracují na stejném principu jako klasické rentgeny používané v lékařství, ovšem intenzita rentgenového záření je v tomto případě vyšší. [12]

Výhodou tohoto typu zařízení je zjištění informací o vnitřní geometrii skenované součásti použitím rentgenového záření. Nevýhodou je dosahovaná míra přesnosti, která není příliš vysoká. [12]

Zařízení jsou většinou mobilní a jsou používána například ke kontrole potrubí, kotlů či jiných uzavřených nádob nebo jsou kombinovány se zařízením CT. [12]

#### **2.2.5.5 CT a MR 3D skenery**

Jedná se o zařízení počítačové tomografie CT, které využívá rentgenové záření a magnetickou rezonanci MR.

Mezi výhody tohoto typu 3D digitalizace patří skenování tvarově složitých povrchů a vnitřní geometrie, aniž by byl skenovaný objekt zničen. Díky těmto vlastnostem se uplatňují v případech, ve kterých ostatní metody selhávají. Nevýhodou je, že skenovaný objekt je nutné umístit do měřicího zařízení, což omezuje rozměry skenovaného objektu. Lze skenovat jen objekty s vhodnými fyzikálními vlastnostmi. Nevýhodou je rovněž vysoká pořizovací cena tohoto zařízení. [2, 15]

Příkladem 3D skeneru pracujícího na principu počítačové tomografie je multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth TomoScope (viz obr. 2.11).



**Obr 2.11: Multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth TomoScope [22]**

## 2.3 Přehled metod 3D skenování

Následující obrázek (obr 2.12) ukazuje stručný přehled metod 3D skenování povrchu součástí a příklady snímacích systémů. V kulaté závorce je uvedena dosahovaná přesnost snímání v milimetrech.

	Typ metody	Příklad zařízení
1	Dotykové metody	Měřicí rameno FARO Arm ( $\pm 0,05$ )
		CMM LK Integra ( $\pm 0,005$ )
		NC stroj Renscan 350 ( $\pm 0,01$ )
		Speciální stroj Cyclone ( $\pm 0,005$ )
2	Optické metody	ATOS III ( $\pm 0,01$ )
		HandyScan ( $\pm 0,05$ )
3	Laserové metody	FARO Laser Line Probe V3 ( $\pm 0,035$ )
4	Destruktivní metody	RE 1000 ( $\pm 0,025$ )
5	Rentgenové metody	Werth TomoScope ( $(2,5+L/120)\mu\text{m}$ )
6	Ultrazvukové metody	Freeport 3D ( $\pm 0,3 \div 0,5$ )

**Obr 2.12: Přehled metod snímání povrchu součástí [11]**

## 2.4 Použití 3D skenerů

3D skenery se v současné době používají čím dál víc a to i proto, že rostou požadavky na rychlé získání digitální podoby nejrůznějších objektů. Na rozdíl od 3D modelátorů (Studio 3D Max, Lightwave, CAD systémy, atd.) u kterých je tvorba modelu časově náročná a digitální model není přesnou kopií reálného objektu, je vytvoření modelu pomocí 3D skenerů

(MicroScribe, ATOS, HandyScan, atd.) mnohem rychlejší, efektivnější a digitální model je přesnou kopií skenovaného reálného objektu. [12]

Nejčastěji se 3D skenery využívají ve strojírenství, v němž se používají k přenosu reálné součásti do digitální podoby, pro což je už zmíněný odborný název reverzní inženýrství. Dále se např. uplatní při měření deformací, při kontrole montáže přesných zařízení či u analýzy tažení plechu. [12]

Důležitým odvětvím je měření odchylek pomocí 3D skenerů. 3D data projdou od původního návrhu po vyrobení součásti tolika transformacemi, že je třeba zkontrolovat, zda konečný výrobek odpovídá původnímu návrhu. Proces kontroly se geometrie se nazývá CAI (Computer Aided Inspection). 3D skener naskenuje prostorová data konečného výrobku a pomocí speciálního programu porovná naměřené hodnoty s původním CAD modelem. [12]

3D skenery nachází uplatnění i v jiných oborech mimo strojírenství, využívají se např. v medicíně, obuvnickém a oděvním průmyslu (3D modely se statisticky zpracovávají pro nalezení nejvhodnějšího tvaru obuvi nebo ošacení) či kosmetickém průmyslu (např. zjišťování účinku krémů na vrásky). [23]

### **3 Software pro reverzní inženýrství**

Bez příslušného softwaru se proces digitalizace neobejde. Software slouží především k získání a zpracování digitalizačních dat. V zásadě jej můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

#### **- Software pro získání digitalizačních dat**

Tato skupina softwaru slouží především k získání prostorových dat ze snímaného objektu. Jedná se zejména o měřicí software (např. program VxScan je vyvinutý přímo pro skenery HandyScan 3D), který je součástí digitalizačního zařízení a často obsahuje i modul pro skenování. [18]

#### **- Software pro zpracování digitalizačních dat**

Druhá skupina softwaru slouží pro správné převedení naměřených dat na CAD model. Na trhu existuje celá řada programů sloužících k tomuto účelu. Jsou to plošné modeláře či složitější CAD/CAM systémy. Příkladem měřicího softwaru je CAMIO studio od společnosti LK, digitalizační balík Easy 3D Scan od společnosti Minolta nebo Geomagic Studio od firmy Raindrop Geomagic. [6, 18]

### **4 Reverse Engineering strojní součásti**

Proces reverzního inženýrství součásti lze rozdělit do čtyř fází (viz obr. 4.1).



**Obr 4.1: Fáze procesu RE [3]**

#### 4.1 Plánování procesu

Proces reverzního inženýrství součásti se skládá z několika fází. První fází je plánování procesu, musí se zvolit měřicí zařízení, způsob měření a forma výstupních dat, rozvinout měřicí strategii a nastavit měřicí parametry. [3]

Měření bylo provedeno 3D skenerem REVscan a probíhalo v laboratoři měření na katedře výrobních systému.

#### 4.2 Popis snímacího zařízení

REVscan (viz obr 4.2) je 3D skener patřící do produktové řady HandyScan 3D (viz kapitola 2.2.5.1 Optické 3D skenery) od společnosti Creaform. Jedná se o rychlý a přesný ruční optický 3D skener určený pro reverzní inženýrství, návrh designu a 3D kontrolu.



**Obr 4.2: 3D skener REVscan**

Vybavení systému REVscan

- REVscan se dodává v lehkém hliníkovém kufříku
- držák na skener
- kalibrační deska
- obslužný program VxScan
- krabičky s reflexními body
- FireWire kabel pro propojení scanneru s počítačem



Hmotnost	0,98 kg
Rozměry	160 x 260 x 210 mm
Snímání	18,000 snímků/s
Laser	II (eye safe)
Rozlišení v ose Z	0.1 mm (0.004 in.)
Přesnost	až 50µm (0.002 in.)
ISO	20µm + 200µm

**Obr 4.3: Technické parametry 3D skeneru REVscan [25]**

### 4.3 Měřená součást

Měřená součást (viz obr. 4.4) se skládá z několika různých ploch, jako rovina, válec, kužel a obecná plocha. Jelikož je spodní část měřené součásti rovina, tak se nemusí obracet a skenovat z opačné strany. Měřená součást neobsahuje žádné otvory a prohlubně, což je výhoda, protože skenování otvorů je komplikované.



**Obr 4.4: Měřená součást**

### 4.4 Příprava digitalizované součásti

Měřená součást se musí připravit ke skenování 3D skenerem. Povrch měřené součásti se musí očistit od nečistot. Aby mohl systém REVscanu určit polohu snímaného objektu, tak se na povrch měřené součásti musí nalepit speciální reflexní značky, ale jelikož je snímaná součást malá, tak stačí reflexní značky umístěné na podložce, na níž bude měřená součást umístěna při skenování. Dále se musí na povrch snímané součásti nanést křídový sprej a to z důvodu zmatnění povrchu. Špatně nakřídovaný povrch by mohl zapříčinit zkreslení naměřených hodnot a vytvoření CAD modelu s chybou.



**Obr 4.5: Měřená součást po aplikaci křídového spreje**

#### **4.5 Kalibrace REVscanu**

Před prvním měřením je nutné systém kalibrovat, což se provádí pomocí kalibrační desky, která je součástí vybavení skeneru REVscan.

#### **4.6 Proces 3D digitalizace**

Měřená součást se umístí na jednu stranu podložky (na obr. 4.5 je vyfocená měřená součást umístěná uprostřed podložky, ještě před přemístěním na jednu stranu podložky). Podložka je skládací, a v případě umístění měřené součásti na prostředek podložky, kde je lem, by se museli při zpracovávání dat provádět úpravy navíc. Skenování součásti by mělo probíhat za stálých světelných podmínek.

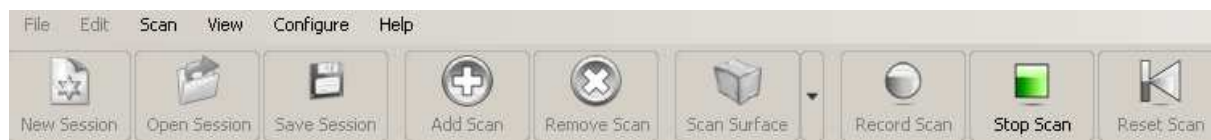


**Obr 4.6: Lem uprostřed podložky**

#### **Postup:**

##### **1. Vytvoření nového projektu**

3D skener REVscan se připojil na počítač a byl zpuštěn program VxScan. V programu VxScan se vytvoří nový projekt (příkaz New Session), do kterého se budou ukládat naměřená data.



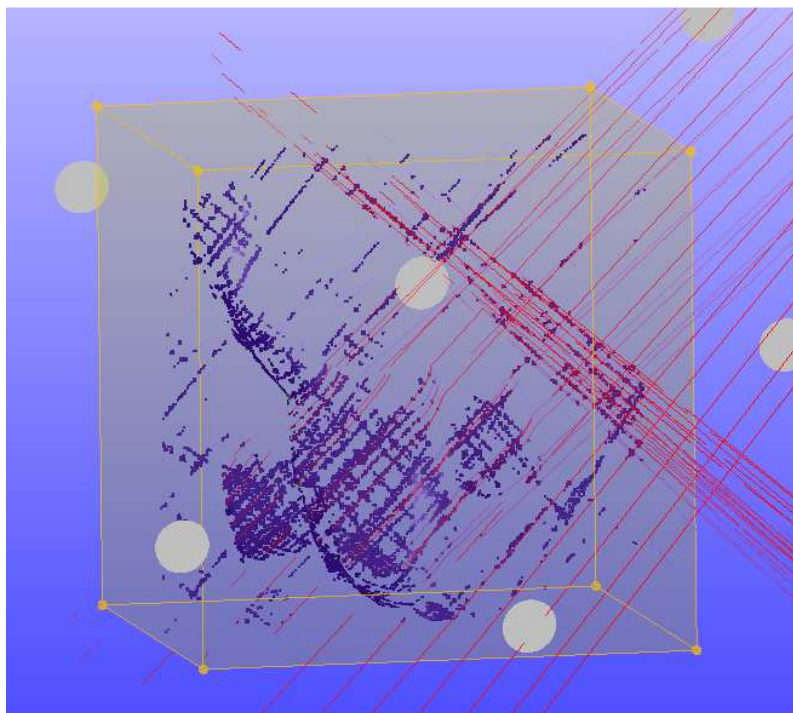
**Obr 4.7: Lišta s příkazy v programu VxScan**

## **2. Zjištění snímané oblast**

Systém skeneru zjistí snímanou oblast, v níž bude probíhat skenování (příkaz Record Scan a po dokončení snímání Stop Scan).

## **3. Naskenování hrubého obrysu**

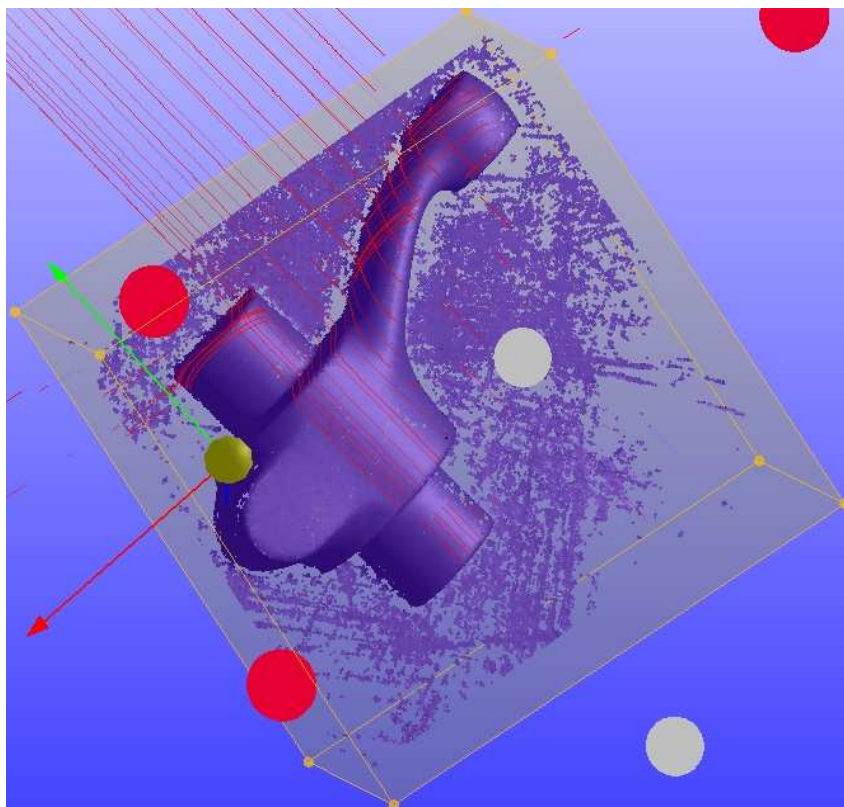
Přepne se na příkaz Scan Surface a opět na příkaz Record Scan. Naskenuje se jen hrubý obrys měřené součásti (po ukončení snímání Stop Scan) a upraví se pracovní prostor. Například se upraví rozlišení.



**Obr 4.8: Hrubý obrys měřené součásti**

## **4. Naskenování součásti**

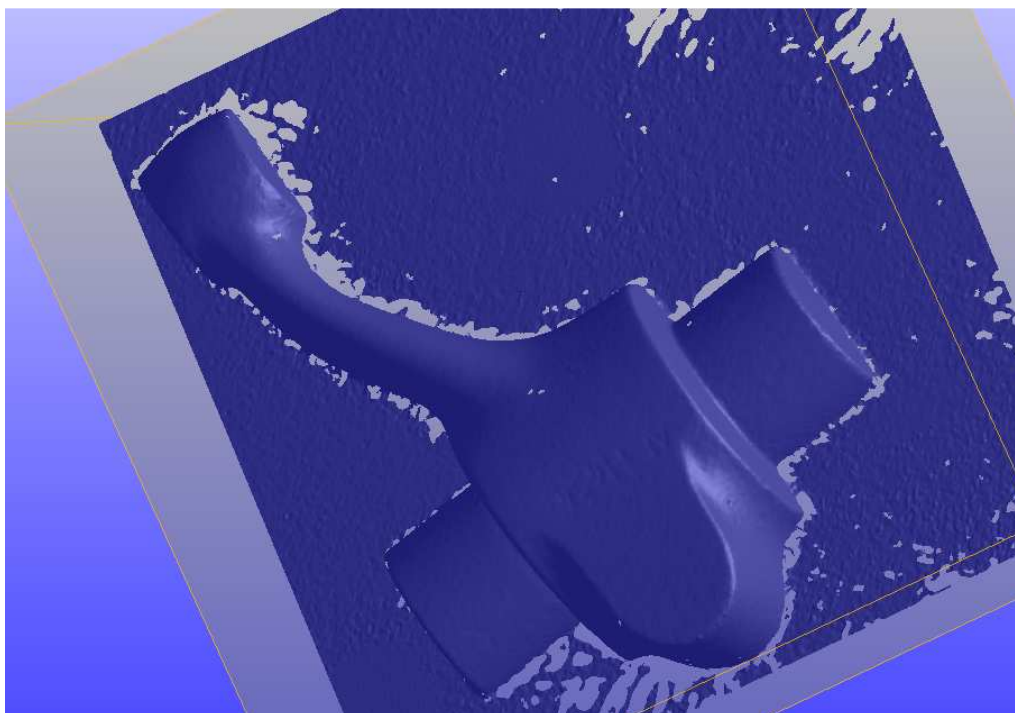
Nastává samotné skenování měřené součásti, jež se spustí příkazem Record Scan (po ukončení snímání Stop Scan). 3D skener REVscan se musí udržovat v určité vzdálenosti od měřené součásti. Barevná mapa umístěna v prostředí programu VxScan nalevo od vytvářeného modelu nám říká, v jaké vzdálenosti od snímané součásti se pohybujeme. Povrch měřené součásti je ozářen laserovým křížem, který je snímán prostřednictvím dvou kamer, na počítači se v reálném čase zobrazuje obraz snímání. Systém zjišťuje vzájemnou polohu skeneru a měřené součásti pomocí reflexních značek umístěných na povrchu podložky, na které je umístěna měřená součást. Snímaná součást se nesmí během skenování posunout vůči podložce, kdyby se posunula, tak by se měření muselo opakovat.



**Obr 4.9: Součást v průběhu skenování**

## **5. Uložení souboru**

Naměřená data naskenované součásti se uloží do příslušného formátu (IGS, STL, TXT) a další úpravy se provádějí v programu Geomagic Studio v. 12.



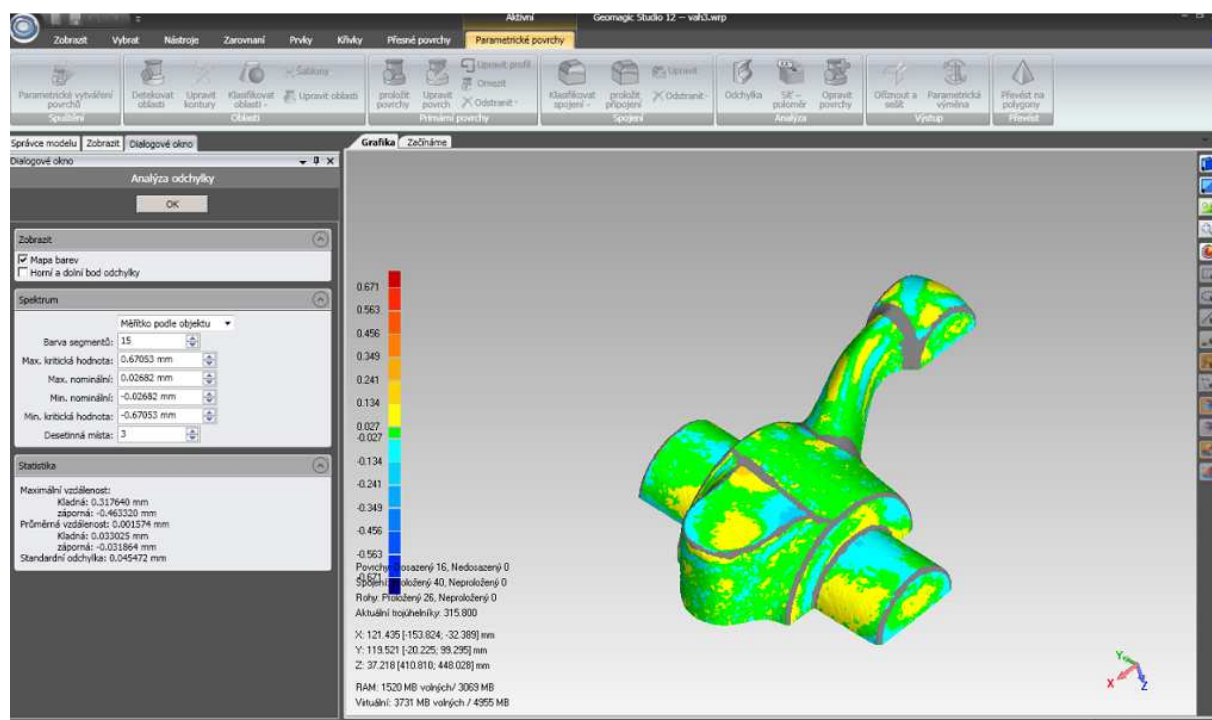
**Obr 4.10: Naskenovaná součást**



## 4.7 Program Geomagic studio v. 12

Geomagic studio je produkt od americké firmy Raindrop Geomagic, která vytváří software pro počítačem řízené zajištění kvality a reverzní inženýrství. [27]

Geomagic studio se zabývá zpracováním 3D modelů do přesných ploch. Automaticky převádí mrak bodů na polygonovou síť, kterou lze pomocí příslušných funkcí upravovat a manipulovat s ní. Geomagic Studio nabízí funkce pro zjednodušování sítě, záplatování děr, vyhlazování, tvorbu skořepiny. Je zde také řada funkcí pro opravu sítě, kontrolu průsečíků, apod. Nabízí příkazy pro změnu orientace sítě, posouvání, otáčení, a spojování sítí. Jsou tu k dispozici nástroje k tvorbě volných a parametrických ploch (např. válec, kužel, rovina). Geomagic Studio umožňuje exportovat data do standardních formátů např. STL, IGES, STEP, DXF. [28]



Obr 4.11: Prostředí programu Geomagic Studio v. 12

## 4.8 Zpracování naměřených dat

Tato fáze je založena na aplikaci počítačového softwaru (Geomagic Studio), který dokáže číst naměřená data ve formě tzv. mraku bodů. Zpracování mraku bodů je založeno především na opravě a konverzi dat do užitečnějšího znázornění ve formě trojúhelníkové sítě nebo NURBS neomezených ploch s eventuálně velkou přesností. [3]

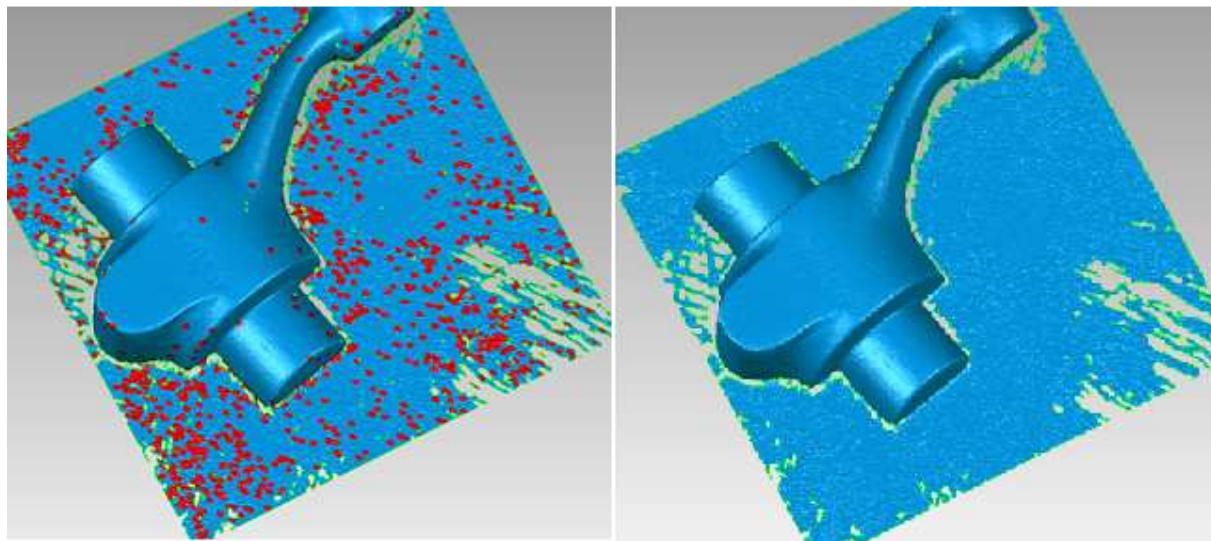
### Postup:

#### 1. Import bodového mraku

V tomto kroku se naměřená data z 3D digitalizace, ve formě mraku bodů, otevřou v programu Geomagic Studio v. 12. V následujících krocích se provedou úpravy a opravy naměřených dat.

## 2. Oprava mnohoúhelníků

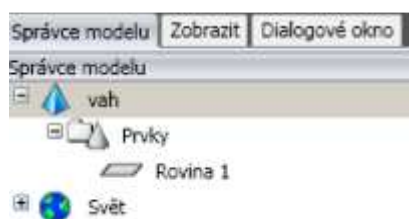
První úpravou je Oprava mnohoúhelníků, která se nachází v menu Mnohoúhelníky. Program identifikuje všechny otvory, které dokáže opravit a nabídne jejich kompletní seznam i s místem lokace k úpravě. Program si s některými otvory neví rady a ty se musí upravit ručně, k čemuž slouží příkaz vyplnit jednotlivě. Plochy určené k opravě jsou označeny červenou barvou (viz obr. 4.12).



Obr 4.12: Součást před (vlevo) a po úpravě (vpravo)

## 3. Vytvoření roviny

Při skenování měřené součásti se naskenovala také podložka, na níž byla měřená součást umístěna. Pomocí této plochy se vytvoří rovina, s níž se bude dále pracovat. Označí se co největší plocha naskenované podložky a menu Prvky se vybere příkaz Rovina. Tímto je rovina vytvořena.



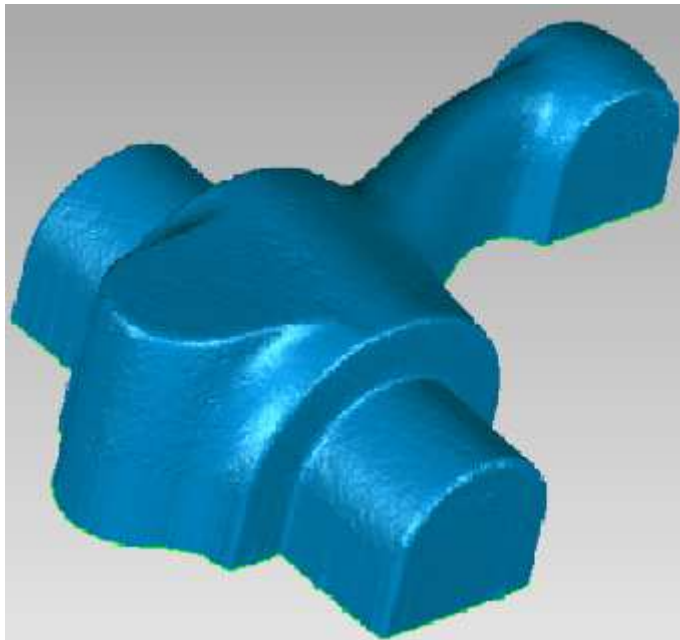
Obr 4.13: Vytvořená rovina ve Správci modelu

## 4. Odstranění nadbytečných dat

Dále se v menu Mnohoúhelníky oddělí model součásti od nasnímaných bodů podložky. Data nasnímané podložky již nejsou potřeba k žádným úpravám a k modelu měřené součásti nepatří, proto se odstraní.

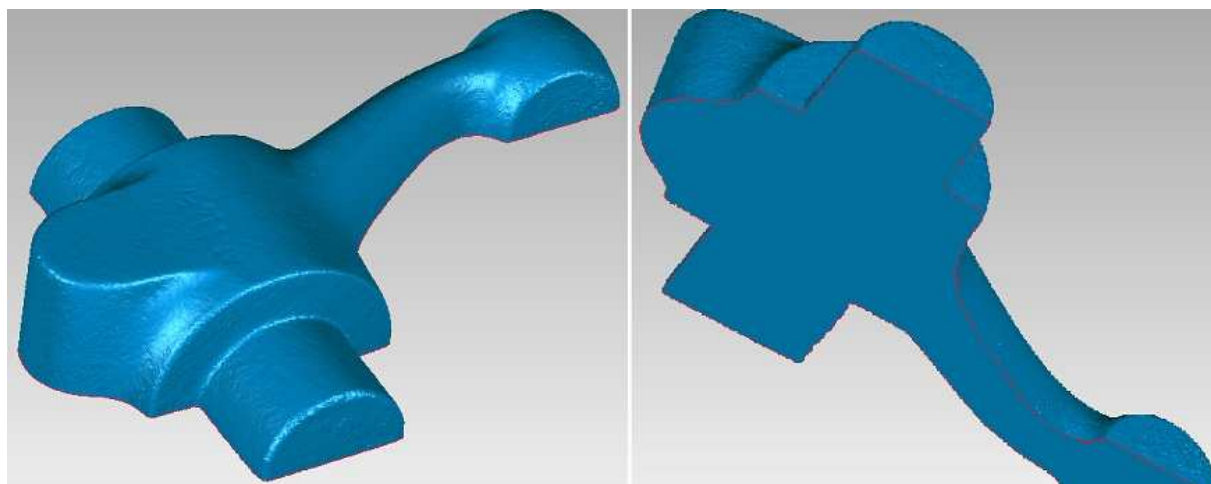
### 5. Oříznutí rovinou

V menu Mnohoúhelníky se zaostří přechodová hrana mezi modelem součásti a vytvořenou rovinou. Dále se v příkazu Upravit hranice promítne hranice zpět na rovinu. Přechodová hrana, jež se v minulém kroku zaostřila, se protáhne o několik milimetrů (např. o 10mm) aby byla za hranicí roviny.



**Obr 4.14: Promítnutí hranice**

Poslední úpravou v tomto kroku je oříznutí rovinou v příkazu Oříznutí. Pomocí roviny tentokrát ořízneme nepotřebný přesah protažení a to ve vzdálenosti 0mm. Uzavřením vzniklého průniku rovinou vznikne výsledný polygon snímané součásti.



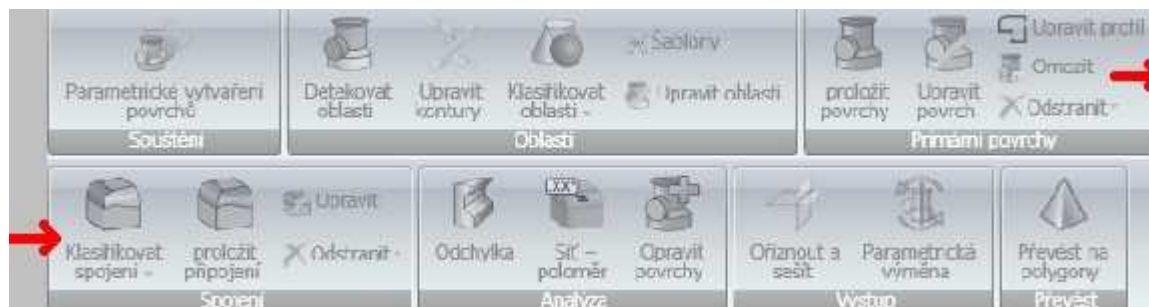
**Obr 4.15: Výsledný polygon snímané součásti**

## 6. Vylepšení polygonové sítě

Bude následovat přechod na parametrické vytváření povrchů, ale předtím je výhodné vylepšit polygonovou síť pro tvorbu ploch, což se provede v příkazu Oprava mnohoúhelníků. Vylepšení polygonové sítě spočívá v zjednodušení sítě v rovinných oblastech a její zhuštění v oblastech s větším zakřivením. Tvar polygonu se nezmění.

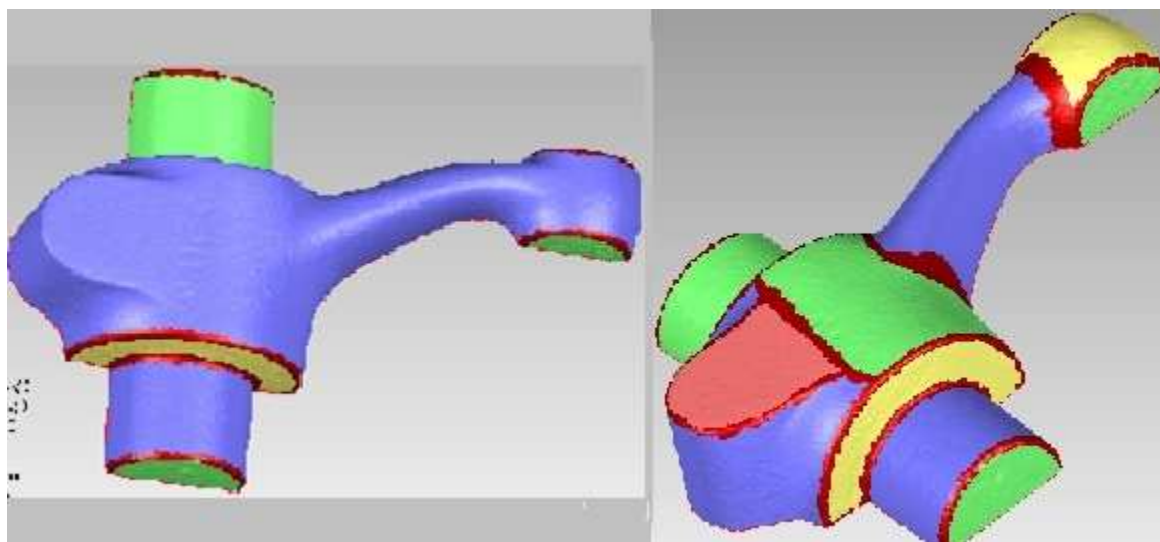
## 7. Přechod na parametrické povrchy

Následující úpravy naskenované součásti proběhnou v menu Parametrické povrchy. Zahájí se spuštěním funkce Parametrické vytváření povrchů a dále se postupuje v menu zleva doprava.



Obr 4.16: Menu Parametrické povrchy

Začíná se příkazem Detekce oblastí, což spočívá v rozdělení polygonu na základě křivosti. Program vypočítá jednotlivé oblasti a nabídne jejich seznam. Oblasti, které program neidentifikuje, se musí dokreslit ručně. Barevné označení jednotlivých ploch je náhodné a nemá žádný určitý význam, akorát slouží k lepší přehlednosti jednotlivých ploch.



Obr 4.17: Součást po rozdělení (vlevo) a po ručním dokreslení oblastí (vpravo)

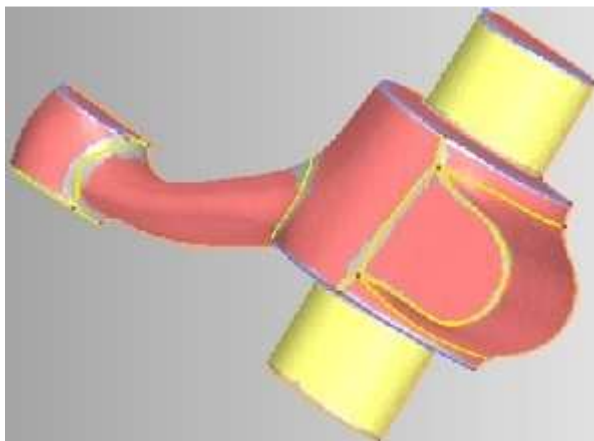
## 8. Úprava kontur

Funkce Upravit kontury automaticky extrahuje kontury, které je většinou ještě potřeba ručně upravit, zkontrolovat a následně také editovat případné problémy. Jednotlivé trasy kontur se vytvoří v oblastech označených červenou barvou (viz obr. 4.17).



## 9. Klasifikace oblastí

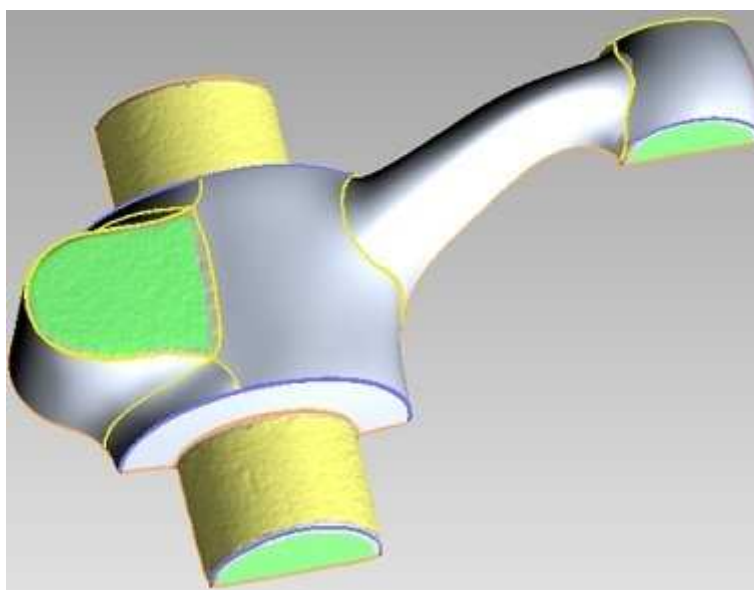
Funkce Klasifikovat oblasti automaticky přiřadí dříve určeným oblastem, matematicky popsatelný geometrický útvar z dané nabídky. Následně se můžou plochy, které program nerozeznal, klasifikovat ručně. V našem případě se použily tyto geometrické útvary: rovina (zelená barva), válec (žlutá barva), kužel (světle modrá barva) a volný tvar (červená barva).



Obr 4.18: Součást během klasifikace oblastí

## 10. Proložení povrchů

Funkce Proložit povrchy vypočítá matematické proložení povrchů, které se klasifikovaly v předešlém kroku. V případě, že se některý povrch nepovede proložit, tak se může pomocí polygonové sítě (např. zvýšením či snížením hustoty vzorkování sítě nebo úpravou kontrolních bodů) upravit. Jestli se úprava nepodaří, tak se musí příslušná plocha editovat v předchozím kroku klasifikace oblastí nebo může dojít i k úpravě kontur. Mimo editované plochy se musí i všechny okolní související plochy následně znovu proložit.



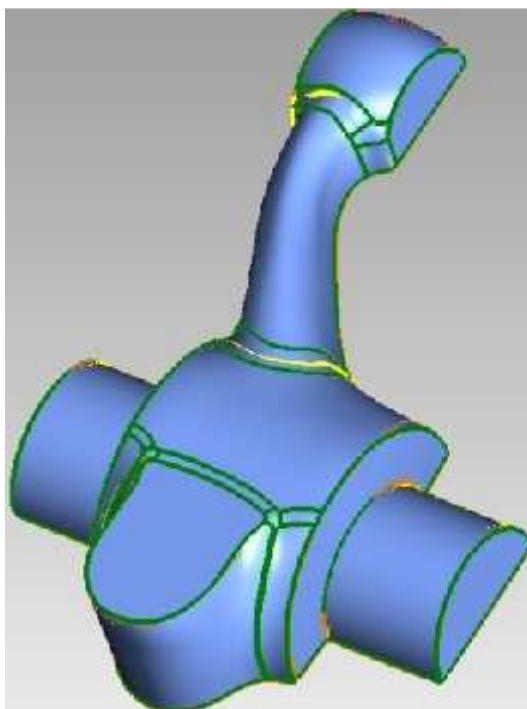
Obr 4.19: Součást během proložení povrchů

## 11. Klasifikace spojení

Následující funkce Klasifikovat spojení automaticky určí přechody mezi jednotlivými plochami. Přechody, které program neidentifikuje, se klasifikují ručně. Barva kontury označuje typ spojení, oranžovou barvou se označuje ostré spojení, žlutá označuje volné nebo oblé spojení a modře se označuje konstantní poloměr.

## 12. Proložení připojení

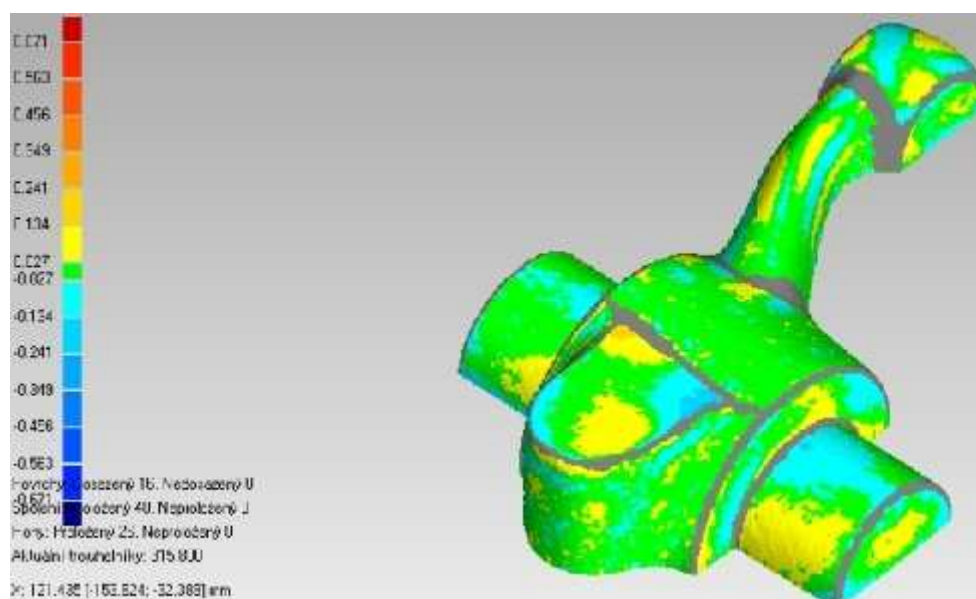
Funkce Proložit připojení vypočítá matematické proložení připojení klasifikovaných v minulém kroku. Pokud tato operace proběhne v pořádku, tak je součást téměř připraven k vytvoření CAD modelu. V případě nějaké chyby je možná editace, podle potřeby se můžou upravit kontury, klasifikace apod. Tyto úpravy lze také udělat v CAD programu po následujících krocích a exportu do standardních formátů.



**Obr 4.20: Součást po dokončení proložení připojení**

## 13. Kontrola

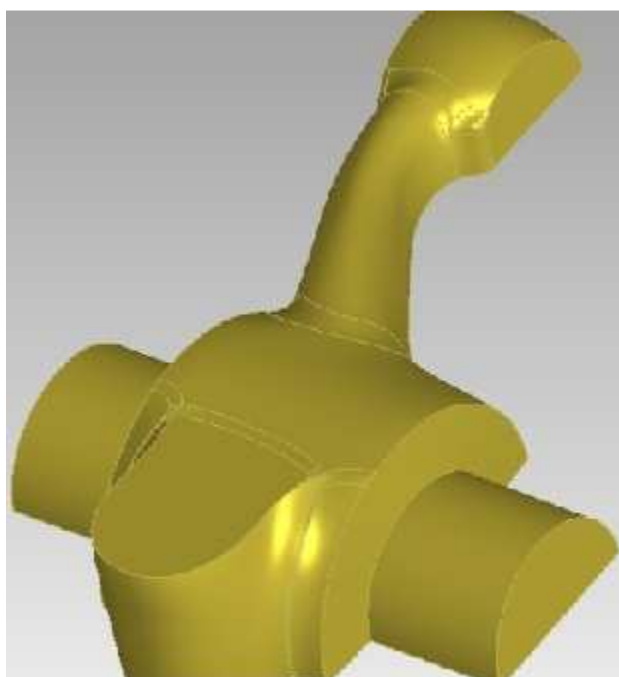
Před převodem upravené součásti do CAD modelu, by měla proběhnout její kontrola. Jednu z možností kontroly nabízí funkce Analýza odchylky, která zkontroluje odchylky vytvořených ploch proti původním bodům ze skenování součásti. Pomocí vytvořené barevné mapy odchylek se dá zkontrolovat, které plochy jsou přesné či kde jsou velké nepřesnosti. Program také ukáže body s největší chybou. V případě že některé plochy nevyhovují, je možné se vrátit zpět a podle potřeby upravit kontury, klasifikace, atd. Také se může zkontrolovat polygonová síť. Plochy, které nemají povrchové problémy, jsou pokryté pravidelnou sítí a naopak složité plochy nebo plochy s poruchou jsou pokryty deformovanou sítí.



**Obr 4.21: Analýza odchylky**

#### 14. Oříznutí a sešití

Funkce Oříznout a sešít vytvoří z upravených dat CAD model, se kterým se již dá pracovat v CAD programech.



**Obr 4.22: Sešitý a oříznutý model**

## **15. Uložení souboru**

Upravená data naskenované součásti se uloží do standardních formátů jako např. IGS, STL, apod. V případě, že je v počítači nainstalován a spuštěn podporovaný CAD program, tak se dá provést parametrická výměna dat.

## **Závěr**

Cíle práce, které spočívali v seznámení se s možnostmi 3D měření a digitalizace ve strojírenství s následným popsáním jednotlivých typů zařízení sloužících k 3D digitalizaci, byly splněny. Součástí práce byla také 3D digitalizace příslušné reálné strojní součásti s využitím skeneru REVscan a dále upravením naměřených dat pomocí programu Geomagic Studio vytvořit CAD model, což bylo také splněno.

Přesnost vytvořených ploch CAD modelu se proti původním bodům ze skenování součásti pohybuje v řádech setin milimetru (až 0,03mm), u několika menších ploch se pohybuje okolo jedné desetiny milimetru.

Získaný CAD model by se dal následně využít v laboratořích katedry výrobních systémů např. k měření odchylek pomocí 3D skenerů. Katedra výrobních systémů kromě optického 3D skeneru REVscan disponuje několika dalšími přístroji (optický 3D skener ATOS II 400, MicroScribe 3DX, souřadnicový měřicí stůl), pomocí kterých by se stejná strojní součást dala naskenovat. Upravením získaných dat v příslušném softwaru (např. program Geomagic Studio) by se vytvořil CAD model. Rozměrovým porovnáním získaných CAD modelů lze porovnat přesnost proložených dat od příslušných měřicích zařízení.

V případě použití systému ATOS by celý proces reverzního inženýrství trval zhruba stejnou dobu, jako při použití 3D skeneru REVscan. 3D skener ATOS byl v době skenování v údržbě a proto se nemohl využít ke skenování. Skenování s 3D skenerem MicroScribe či souřadnicovým měřicím stolem je v porovnání se 3D skenerem REVscan časově mnohem náročnější.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. 1. vydání. Liberec, 1999. 76 s. Technická univerzita v Liberci. [cit. 2011-04-16]. ISBN 80-7083-326-2.
- [2] JANEČKA, Karel. *Digitalizace výfukového potrubí*. [online]. Brno, 2009. 51 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek Ph.D. [cit. 2011-04-16]. Dostupné na WWW: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15581](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15581).
- [3] DYBALA, B., BORATYŇSKI, T., CZAJKA, J., BEDZA, T., FRANKIEWICZ, M., KURZYŃOWSKY, T. *Mechatronika Modul 9: Rychlé vytváření prototypů*. [online]. Polsko, 2009. 123 s. University of Wroclaw. [cit. 2011-04-16]. Dostupné na WWW: <http://www-user.tu-chemnitz.de/~lynn/ADAM/neu/Bücher/Modul%209%20Tschechisch%20komplett.pdf>.
- [4] URBÁNEK, Aleš. *Kontrola součástí pomocí metod reverzního inženýrství*. [online]. Brno, 2008. 46 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Zouhar. [cit. 2011-04-14]. Dostupné na WWW: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5595](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5595).
- [5] ŠIMONÍK, Martin. *Digitalizace - její princip a rozdělení*. [online]. MM Průmyslové spektrum. 2004. [cit. 2011-04-12]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>. ISSN 1212-2572.
- [6] NAVRÁTIL, Robert. *Reverse Engineering - trocha teorie*. [online]. 2002. [cit. 2011-04-12]. Dostupné na WWW: <http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/index.html>.
- [7] SLÁMA, Josef. *Prostě to použijte!*. [online]. MM Průmyslové spektrum. 2008. [cit. 2011-04-12]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/proste-to-pouzijte>. ISSN 1212-2572.
- [8] MITUTOYO. *Souřadnicové měřicí stroje*. [online]. [cit. 2011-04-12]. Dostupné na WWW: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/sms.pdf>.
- [9] SEDLÁK, J., FIŠEROVÁ, V. *Digitalizace objektů a zpracování dat*. [online]. [cit. 2011-04-16]. Dostupné na WWW: [http://www.visual.cz/cs/site/knews/Akce\\_Visual/Prednasky\\_OpeningDay2008/Sedlak\\_PDF.PDF](http://www.visual.cz/cs/site/knews/Akce_Visual/Prednasky_OpeningDay2008/Sedlak_PDF.PDF).

- [10] NENÁHLO, Čeněk. *Souřadnicová měřicí technika*. [online]. MM Průmyslové spektrum. 2011. [cit. 2011-04-16]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika>>. ISSN 1212-2572.
- [11] KROUPA, Miroslav. *Porovnání přesnosti digitalizované tvarové plochy s původní plochou modelu*. [online]. Plzeň, 8 s. Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2011-04-19]. Dostupné na WWW: <[http://old.fst.zcu.cz/\\_files\\_web\\_FST/\\_SP\\_FST\(SVOC\)/\\_2008/\\_sbornik/PapersPdf/Ing/Kroupa\\_Miroslav.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2008/_sbornik/PapersPdf/Ing/Kroupa_Miroslav.pdf)>.
- [12] NAVRÁTIL, Robert. *3D skenery*. [online]. 2000. [cit. 2011-04-19]. Dostupné na WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
- [13] FOŘT, P., JANÁČEK D. *MicroScribe pro snadnou 3D digitalizaci*. [online]. 2006. [cit. 2011-04-19]. Dostupné na WWW: <<http://www.designtech.cz/c/it-reseni/microscribe-pro-snadnou-3d-digitalizaci.htm>>.
- [14] KOLAVIK, Jiří. *3D digitalizace prostorových objektů v soudně inženýrské praxi*. [online]. Brno, 10 s. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2011-04-19]. Dostupné na WWW: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/7/Kolavik\\_Jiri\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/7/Kolavik_Jiri_CL.pdf)>.
- [15] SKOUPÝ, Pavel. *3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství*. [online]. Brno, 2007. 59 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek. [cit. 2011-04-30]. Dostupné na WWW: <[http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=264](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=264)>.
- [16] MAČÁK, Josef. *Optický skener v průmyslové praxi*. [online]. MM Průmyslové spektrum. 2008. [cit. 2011-04-30]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/opticky-skener-v-prumyslove-praxi>>. ISSN 1212-2572.
- [17] MCAE SYSTEMS. *3D Digitální technologie. Atos*. [online]. [cit. 2011-04-21]. Dostupné na WWW: <<http://www.mcae.cz/atos>>.
- [18] SÍŘIŠTĚ, D., SKOPEČEK T., KAPINUS, V. *Reverzní inženýrství, digitalizace a výroba forem*. [online]. MM Průmyslové spektrum. 2004. [cit. 2011-04-24]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/reverzni-inzenyrstvi-digitalizace-a-vyroba-forem>>. ISSN 1212-2572.
- [19] ŠNAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. [online]. Brno, 2008. 49 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl. [cit. 2011-04-20]. Dostupné na WWW: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6001](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6001)>.
- [20] ROZSÍVAL, Jan. *Využití reverzního inženýrství pro výpočty aerodynamiky automobilu*. [online]. Brno, 2008. 75 s. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké

- učení technické v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Ph.D. [cit. 2011-04-18]. Dostupné na WWW: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5601](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5601)>.
- [21] TŘEČEK, Jiří. *Přenosné souřadnicové měřicí stroje*. [online]. 2005. [cit. 2011-05-01]. Dostupné na WWW: <<http://www.designtech.cz/c/caq/prenosne-souradnicove-merici-stroje.htm>>.
- [22] PRIMA BILAVČÍK. *Souřadnicové stroje*. [online]. [cit. 2011-05-01]. Dostupné na WWW: <<http://www.instrumenty-pomiarowe.pl/souradnicove.php?txt=324&lg=CZ>>.
- [23] KOROUS, MARTIN. *3D skenery*. [online]. 2007. [cit. 2011-05-03]. Dostupné na WWW: <<http://www.markonet.cz/pages/vyuka/principy-pocitacu/3d-skenery.php>>.
- [24] DRÁPELA, MIROSLAV. *Rapid Prototyping (RP) & Reverse Engineering (RE)*. [online]. [cit. 2011-05-03]. Dostupné na WWW: <<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZRI/RE.pdf>>.
- [25] HANDYSCAN 3D. *Technické informace*. [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné na WWW: <<http://www.handyscan.cz>>.
- [26] SOLIDVISION. *3D skenery*. [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné na WWW: <<http://www.solidvision.cz/3d-skenery/>>.
- [27] VAŠÍKOVÁ, M. *Rekonstrukce 3D ploch kapotáže motocyklu na základě skenovaných dat*. [online]. Brno, 2010. 42 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D. [cit. 2011-05-08]. Dostupné na WWW: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=30209](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30209)>.
- [28] 3D-SKENOVANI. *Geomagic*. [online]. [cit. 2011-05-08]. Dostupné na WWW: <<http://www.3d-skenovani.cz/geomagic>>.



## Seznam obrázků

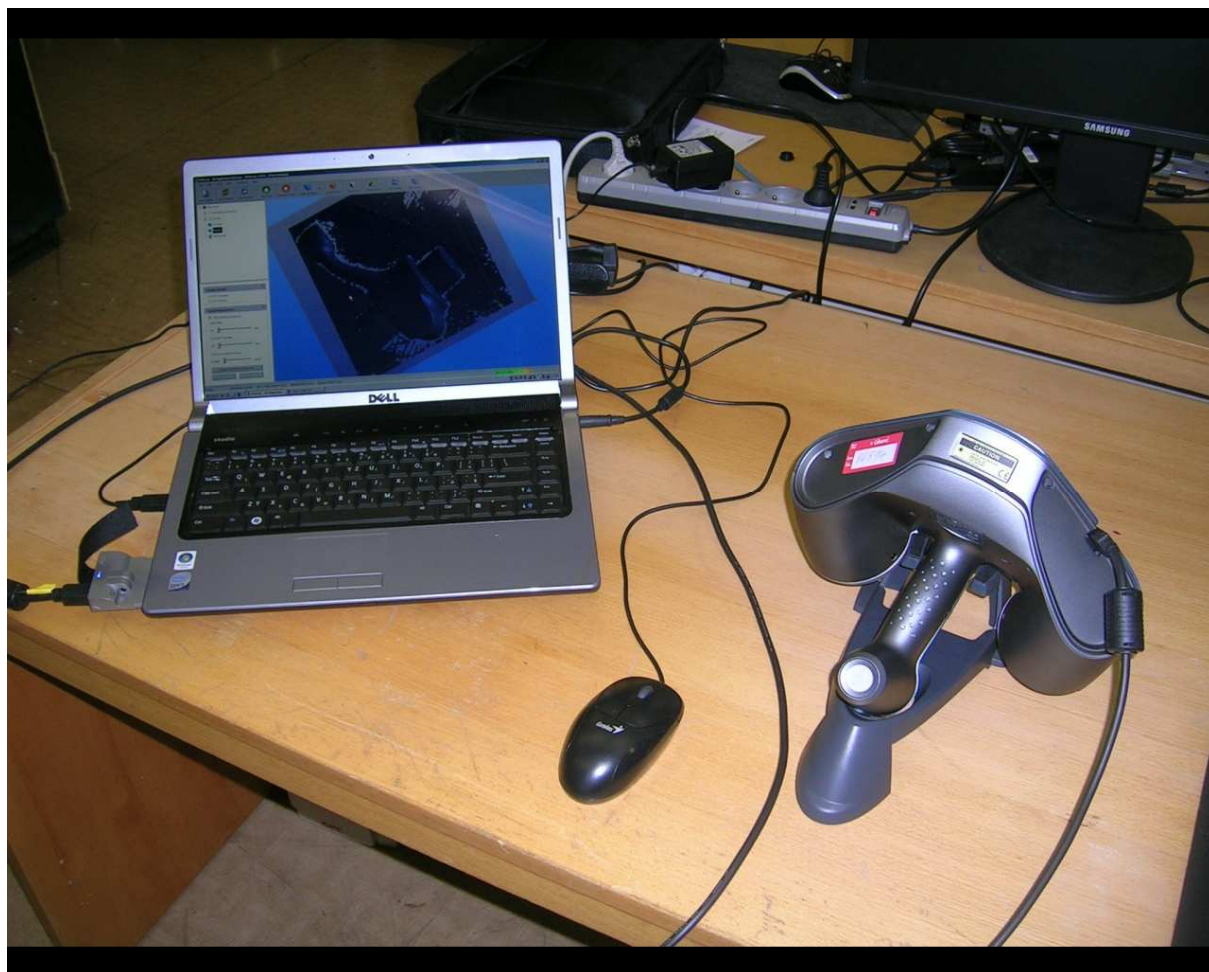
Obr 1.1: Schéma reverzního inženýrství [6]	10
Obr 1.2: Oblasti použití procesu Reverse Engineering [6]	11
Obr 2.1: Rozdělení 3D skenerů	12
Obr 2.2: Schéma destruktivního skenovacího procesu (nalevo); zařízení na měření předmětů použitím destruktivní metody (napravo) [3]	13
Obr 2.3: 3D souřadnicový stroj od firmy Mitutoyo [8]	14
Obr 2.4: Sondy pro CMM systémy [7]	15
Obr 2.5: Mechanický skener MicroScribe G2 [13]	16
Obr 2.6 Přenosná měřicí ramena [3]	16
Obr 2.7: ATOS - automatizované skenování s robotem KUKA (nalevo); optický 3D skener ATOS III (napravo) [17]	18
Obr 2.8: Zleva REVscan, EXAscan, VIUscan, MAXscan [25]	20
Obr 2.9: Laserový 3D skener Vivid 700 [12]	21
Obr 2.10: Princip ultrazvukového 3D skeneru Freepoint [12]	22
Obr 2.11: Multisenzorový souřadnicový měřicí stroj Werth TomoScope [22]	23
Obr 2.12: Přehled metod snímání povrchu součásti [11]	23
Obr 4.1: Fáze procesu RE [3]	25
Obr 4.2: 3D skener REVscan	25
Obr 4.3: Technické parametry 3D skeneru REVscan [25]	26
Obr 4.4: Měřená součást	26
Obr 4.5: Měřená součást po aplikaci křídového spreje	27
Obr 4.6: Lem uprostřed podložky	27
Obr 4.7: Lišta s příkazy v programu VxScan	28
Obr 4.8: Hrubý obrys měřené součásti	28
Obr 4.9: Součást v průběhu skenování	29
Obr 4.10: Naskenovaná součást	29
Obr 4.11: Prostředí programu Geomagic Studio v. 12	30
Obr 4.12: Součást před (vlevo) a po úpravě (vpravo)	31
Obr 4.13: Vytvořená rovina ve Správci modelu	31
Obr 4.14: Promítnutí hranice	32
Obr 4.15: Výsledný polygon snímané součásti	32
Obr 4.16: Menu Parametrické povrchy	33
Obr 4.17: Součást po rozdělení (vlevo) a po ručním dokreslení oblastí (vpravo)	33
Obr 4.18: Součást během klasifikace oblastí	34
Obr 4.19: Součást během proložení povrchů	34
Obr 4.20: Součást po dokončení proložení připojení	35
Obr 4.21: Analýza odchylky	36
Obr 4.22: Sešitý a oříznutý model	36

## Seznam příloh

Příloha 1: Průběh skenování	44
Příloha 2: Měřicí pracoviště obr. 1	45
Příloha 3: Měřicí pracoviště obr. 2	46



**Příloha 1: Průběh skenování**



**Příloha 2: Měřicí pracoviště obr. 1**



**Příloha 3: Měřicí pracoviště obr. 2**